2019

Jahrbuch Oberflächentechnik

BAND 75

downloaded from www.hanser-elibrary.com by SLUB Dresden on December 1, 2021
For personal use only.

LEUZE VERLAG
seit 1902

Neue Ansätze zur Beschichtung von Werkzeugkanten

Tim Krülle, Frank Kaulfuß, Otmar Zimmer, Christoph Leyens
Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS, Dresden

Werkzeuge für die Zerspantechnik unterliegen besonders hohen Beanspruchungen im Bereich der Schneidkante. Deshalb werden bereits seit Jahrzehnten Verschleißschutzschichten zum Schutz der Kanten aufgebracht. Dabei ist die Stabilität einer beschichteten Kante von deren spezifischer Geometrie, der Rauheit, dem zu zerspanenden Material und dem aufzubringenden Schichtsystem abhängig. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung von AlCrN-basierten Mehrlagenschichtsystemen und kathodischen Vakuumbogen-Beschichtungsprozessen, welche eine Reduzierung des Schneidkantenradius während der Schichtabscheidung ermöglichen. Damit soll es perspektivisch möglich sein, höhere Ausgangsradien bei der Werkzeugauswahl zu berücksichtigen und mit einer frei einstellbaren Kantengeometrie anforderungsgerechte Beschichtungslösungen anzubieten.

Tools for cutting applications are subject to particularly high loads in the area of the cutting edge. For this reason, wear protection layers have been applied to protect the edges for decades. The stability of a coated edge depends on parameters such as edge geometry, roughness, the material to be machined and the coating material system to be applied. This work deals with the investigation of AlCrN-based multilayer systems and cathodic arc coating processes, which allow a reduction of the cutting edge radius during the deposition process. Thus, it should be possible to consider higher starting radii when selecting tools and to offer coating solutions with a freely adjustable edge geometry.

download from www.hanser-elibrary.com by SLUB Dresden on December 1, 2021
For personal use only.

1 Grundzüge der Plasmabeschichtung

Die Beschichtung komplex geformter Geometrien, wie sie bspw. bei Schneidwerkzeugen aller Art auftreten, bereitet Anbietern von Beschichtungen nach wie vor Probleme. Führt die Abscheidung von Schichten auf einfachen Substraten, wie flachen Bauteilen, Bändern oder Zylindern meist zu einer relativ homogenen und gleichmäßigen Schichtdickenverteilung entlang der Oberfläche, so ist die Schichtdickenverteilung an kantigen, spitzen oder mit Löchern versehenen Oberflächen stark abhängig von der jeweiligen Position auf der Probenoberfläche. Einflussgrößen für ein solches Verhalten sind neben der Sichtlinien-charakteristik von PVD-Prozessen (Aspektverhältnis bei Bohrungen, Öffnungswinkel bei Zahnrädern, Ausrichtung von Flächen relativ zum einfallenden Partikelstrom) vor allem durch elektrische Feld- und Plasmaeigenschaften bestimmt.

Die Beschichtung von ebenen Körpern führt erfahrungsgemäß zu einer in der Regel homogenen und gleichmäßigen Schichtdicke auf dem Substrat. An komplex geformten Bauteilen, wie Werkzeugen für die spanende Verarbeitung etwa, treten u. a. Kanten, Ecken und Hinterschneidungen auf, welche aufgrund von sog. Kanteneffekten einer möglichst gleichmäßigen Werkzeugbeschichtung entgegenstehen. Allein das Vorhandensein dieser Bauteilformen führt bereits zu einer geometrisch bedingten Abschattung (*Abb. 1, links*). Beim Anlegen einer am Substrat wirkenden Biasspannung kommen elektrische Feldeffekte dazu. So kommt es an Spitzen zu einer Überhöhung und in Vertiefungen zu einer Abschwächung des elektrischen Feldes. Der Effekt der Feldüberhöhung lässt sich mit spitzer werdendem Kantenwinkel bzw. kleiner werdendem Oberflächenkrümmungsradius noch deutlich steigern (*Abb. 1, rechts*).

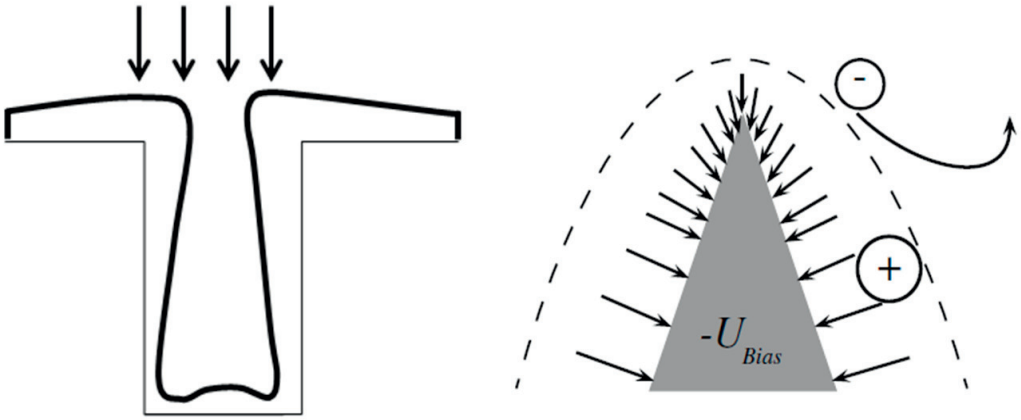


Abb. 1: Veranschaulichung der Beschichtungseffekte; links: geometrischer Effekt durch Abschattung der Sichtlinienscharakteristik von PVD-Verfahren; rechts: Feldeffekt an spitzer Kante bei anliegender Biasspannung $-U_{Bias}$ nach [7] und [16]

1.1 Untersuchungen zum Einfluss der Geometrie

In der Vergangenheit sind Eigenschaften von unzähligen Schichtsystemen hinsichtlich ihrer Schicht- und Einsatzeigenschaften untersucht worden. Dabei standen besonders Eigenschaftsveränderungen auf flachen Substraten im Vordergrund, da diese sehr einfach zu charakterisieren sind. Für den Einsatz von Schichten müssen aber auch die Eigenschaften auf realen, komplex geformten Oberflächen berücksichtigt und analysiert werden. Hierzu ist bisher ein recht kleiner und übersichtlicher Stand erreicht. Exemplarisch sind in *Tabelle 1* Arbeiten aufgeführt, die besonders zum Verständnis von Beschichtungseffekten an Realgeometrien bei der Dünnschichtabscheidung beigetragen haben. Auffällig ist, dass Untersuchungen zu einem überwiegenden Teil am binären Hartstoffsystem TiN stattfanden.

2 Experimenteller Aufbau und Charakterisierungsmethoden

Die Prozess- und Beschichtungsentwicklung erfolgte durch Anwendung der etablierten DC-Vakuumbogentechnologie (CAE) mit einer industriellen Beschichtungsanlage vom Typ MR313 der Firma Metaplas Ionon aus Bergisch-Gladbach (*Abb. 3*). Die Beschichtungsanlage kann mit zwei Verdampfern parallel betrieben werden, wobei im Rahmen dieser Arbeit ein magnetfeldgesteuerter Rechteck- und ein magnetfeldgesteuerter Rundverdampfer (weitere Daten siehe *Tab. 2*) verwendet wurden.

Die in *Tabelle 2* aufgelisteten Verdampfungsmaterialien sind bis auf die schmelzmetallurgisch hergestellte Ti-Rechteckkathode pulvermetallurgisch erzeugt und alle kommerziell erhältlich.

Der im Rahmen dieser Arbeit verwendete Probensatz (*Abb. 4*) bestand für jede Beschichtung aus Flachproben (Hartmetall, Abmessungen 20 x 10 x 3 mm) und modellhaften Proben für die Kantenvermessung (Hartmetall, 3 Schneiden, Ø 8 mm).

Während Flachproben für grundlegende Untersuchungen zur chemischen Zusammensetzung, der Abscheiderateraten oder Phasenzusammensetzung herangezogen werden, dienen die Fräserproben vor allem der Evaluation der Kantenbeschichtung sowie der Vermessung der beschichteten Kanten. Mittels eines Planetengetriebes können die Substrate in eine definierte Drehung mit einstellbarer Umdrehungsgeschwindigkeit und mehrfachen Drehachsen versetzt werden.

Vor der eigentlichen Beschichtung erfolgte eine nasschemische Reinigung in Galvex 17.30 SUP-haltigen ultraschallunterstützten Bädern und in deionisiertem Wasser für wenige Minuten, anschließend ein Trocknungsschritt unter Trockenluftstrom. Nach dem Einbau und dem Evakuieren der Beschichtungskammer sind die Proben Elektronenbeschuss zum Aufheizen ausgesetzt, bevor sie mittels Titanionensputtern und einer bogenunterstützter Glimmentladung (AEGD) weitere Reinigung bzw. Entfernung von nichtleitenden Bereichen auf der Probe erfahren.

downloaded from www.hanser-elibrary.com by SLUB Dresden on December 1, 2021
For personal use only.

Tab. 1: Wichtige Arbeiten auf dem Gebiet der Beschichtung komplexer Geometrien (RMS – Reaktives Magnetronsputtern / (D)MS – (Doppel-)Magnetronsputtern / CAE – Kathod. Vakuumbogenverdampfung / UBMS – Unbalanced Magentronsputtern / HCD – Hohlkathodenentladung / CVD – Chem. Gasphasenabscheidung)

Schichtsystem	*Verfahren*	*Abhängigkeiten und Untersuchungen*	*Referenz*
TiN	RMS	Durchgeführt wurde eine Schichtdickenvariation für Biasspannungen zwischen -350 V bis -500 V: hier fehlt die TiN-Schicht an den Kanten, während bei einer Biasspannung von -200 V eine dünne Schicht in Kantennähe aufwächst. Höhere Schichtdicken entstehen an Kanten im Bereich von 32 V bis -150 V, die auf eine geringe Rücksputterausbeute zurückzuführen sind. Ein höherer Ar-Gasdruck (mehr Stoßprozesse zwischen den Teilchen in der Kammer) schwächt den Kanteneffekt ab, Rücksputtern wird unterdrückt, die Schichtdicke wird kaum beeinflusst.	[1]
TiN	MS	Bestimmung geometrieabhängiger Härteverläufe. Dabei findet eine Bildung dichterer und härterer Schichten in Kantennähe statt. Je größer der Kantenwinkel, desto härter wird die abgeschiedene Schicht.	[2]
TiN	DMS + UBMS	Ermittlung geometrieabhängiger Schichtdickenverteilung: je spitzer die Kante, umso niedriger die Schichtdicke; die Härte steigt zur Kante hin, je spitzer die Kante, desto geringer die Härte.	[3]
TiN	RMS, CAE, HCD	Die Schichtdicke an Kanten sinkt durch Rücksputtern, sie sinkt mit abnehmendem Keilwinkel. Bei der CAE-Beschichtung kommt es aufgrund einer höheren Ionisierung des Plasmas zu einer besseren Tiefenbeschichtbarkeit, ein höherer Gasdruck führt zu höherer Schichtdicke an der Kante; die Härte an Kanten ist geringer als auf der Flachprobe. Des Weiteren wird eine Analyse der Beschichtbarkeit von Kanten mit Kantenwinkeln von 30°, 54° und 90° und Vertiefungen vorgenommen. Im Vergleich zu anderen Beschichtungsverfahren lieferte CAE die höchsten Beschichtungsraten sowie eine relativ gleichmäßige Schichtdickenverteilung entlang der Kanten. Bei einem Kantenwinkel von 30° sank die Schichtdicke mit zunehmender Entfernung von der Kante, während sie bei 54° und 90° zunächst absank, mit weiter steigendem Abstand von der Kante allerdings wieder anstieg. Bei Ermittlung der Schichthärte wurde festgestellt, dass Schichten, welche mit der CAE hergestellt worden sind, höhere Schichthärten aufweisen als mit RMS abgeschiedene Schichten.	[4]
CrN	CAE	Durchführung von Beschichtungen auf Proben mit unterschiedlichen Kantenwinkeln und Flachprobe. Beim Anlegen einer Biasspannung zeigte sich mit abnehmendem Kantenwinkel und zunehmender Spannung zwischen -100 V und -400 V eine verstärkte Anhäufung von Makropartikeln und damit eine Aufrauhung der Kante. Außerdem konnte in der Kantenregion eine Zunahme der Beschichtungsrate mit steigendem Kantenwinkel im Vergleich zu einer Flachprobe festgestellt werden. Die Anhäufung von Makropartikeln konnte durch eine gepulste Biasspannung verringert werden.	[5]
TiN	CAE, RMS	Zwei Geometrien (Schneiden mit rechtwinkliger bzw. spitzwinkliger Kante) wurden bei Biasspannungen von 0 V, -30 V und -60 V beschichtet. Mit zunehmender Biasspannung sank dabei die Beschichtungsrate und die Druckeigenspannungen stiegen. Während des Beschichtungsprozesses mit Biasspannung tritt ein erhöhtes Ionenbombardement an Kanten und Spitzen gekrümmter Proben auf.	[6]

downloaded from www.hanser-elibrary.com by SLUB Dresden on December 1, 2021
For personal use only.

Schichtsystem	*Verfahren*	*Abhängigkeiten und Untersuchungen*	*Referenz*
TiAlCrYN, TiAlN/VN,	CAE + UBMS,	Schichten, welche an Kanten unter erhöhter Ionenflussdichte abgeschieden werden, zeigen andere Eigenschaften als Schichten auf flachen Substraten. Dazu erfolgte eine vergleichende Studie von TiAlCrYN-Schichten auf verschiedenen Proben (Winkel 30°, 45° und 60°, Radius 2 µm und 100 µm). Die angelegte Biasspannung betrug -75 V. Das Al/Ti-Verhältnis steigt mit zunehmender Entfernung von der Kante und größer werdendem Kantenwinkel leicht an, was auf ein partielles Rücksputtern von Al an der Kante deutet. Während das Al/Ti-Verhältnis bei allen Proben an der Kante nahezu gleich ist, divergiert es mit zunehmendem Abstand von der Kante. Bei der 60°-Kante erreicht das Al/Ti-Verhältnis den Wert der Flachprobe mit größer werdendem Kantenabstand. Einfluss des Kantenradius ist bei der 30°-Kante deutlicher ausgeprägt als bei der 60°-Kante. Je kleiner der Radius, desto kleiner ist auch das Al/Ti-Verhältnis aufgrund der stärkeren Sputterwirkung. Bei der Schichtdickenverteilung wurde festgestellt, dass alle Kanten eine dickere Schicht im Vergleich zu Flachproben aufweisen, wobei der Effekt mit zunehmendem Kantenwinkel abnimmt. Im Gegensatz dazu stehen die Untersuchungen von TiAlN/VN-Schichten. Die Schichten wurden bei -75 V bis -150 V abgeschieden. Einfluss der Kante (Winkel 30°, 45° und 90°) auf den Einfallswinkel der Ionen wurde festgestellt. Änderungen in der Schichtmorphologie, Schichtdicke, Zusammensetzung und Struktur waren die Folge. Direkt an der Kante (bis 0,3 mm) fehlte die Schicht komplett, im kantennahen Bereich (1-2 mm von der Kante) begann die Schicht teilweise zu delaminieren, was mit einem Absinken des Al/Ti-Verhältnisses und einem Anstieg des Ioneneinfallswinkels und der Ionenflussdichte einherging. Ungestörter Bereich, weit von der Kante entfernt, ist durch eine dichte Schicht, ein konstantes Al/Ti-Verhältnis, eine konstante Rücksputterrate von Al, eine konstante Ionenflussdichte und einem Ioneneinfallswinkel von 0° gekennzeichnet. Direkt an der Kante ist die Al-Rücksputterrate um eine Größenordnung höher als im ungestörten kantenfernen Bereich, der Einfallswinkel stieg von 0° auf nahezu 90°. Zudem war ein starker Anstieg der Ionenflussdichte zu verzeichnen. Folgende Einflussgrößen wurden gegenüber gestellt: Kanteneffekte sind mit der Form der Plasmarandschicht verbunden, welche durch die Kantengeometrie beeinflusst wird. *(Fortsetzung auf der nächsten Seite)*	[7–10]

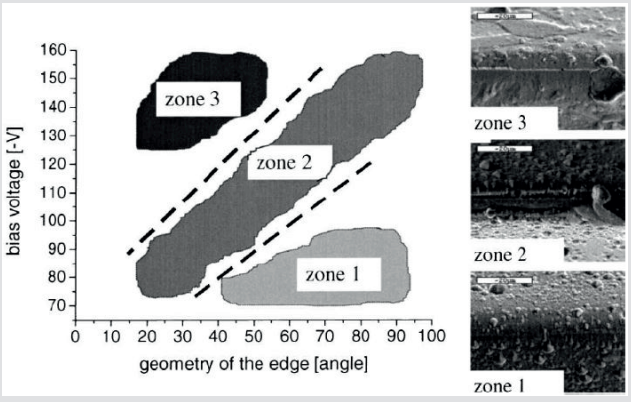


Abb. 2: Zonendiagramm: Darstellung der Kantenbedeckung in Abhängigkeit von der Biasspannung und dem Kantenwinkel [8–10]

downloaded from www.hanser-elibrary.com by SLUB Dresden on December 1, 2021
For personal use only.

downloaded from www.hanser-elibrary.com by SLUB Dresden on December 1, 2021
For personal use only.

Schichtsystem	*Verfahren*	*Abhängigkeiten und Untersuchungen*	*Referenz*
		Die Rückspulterrate ist von der Energie des Ionenflusses (Bias-abhängig) und der Art der Ionen (Ar-Ionen führen zu einer höheren Sputterausbeute als N-Ionen) abhängig. Zusammenfassend wurde ein Zonendiagramm entwickelt, welches den Zusammenhang zwischen Biasspannung und Kantenwinkel beschreibt. Einteilung in drei Bereiche: Zone 1: Kanten weisen auch entfernt von Kante eine homogene und geschlossene Schicht auf Zone 2: Schicht entlang der Kante fehlt partiell Zone 3: Entlang der Kanten fehlt Schicht komplett.	
Diamant	CVD	Entwicklung eines Plasmaschärfungsprozesses mit Ar-Ionen zur Kantenschärfung. Die Schneidkante wird dabei schärfer als das Ausgangswerkzeug.	[11–13]
TiAlCrSiN, TiAlN	CAE	Ein Rücksputtern an Kanten führt zu einem Schärfungseffekt, da die Sputterausbeute steigt. Eine Biasspannung von -80 V führt zu leichter Schärfung der Kante und hoher Eigenspannung, Biasspannung von -40 V hingegen zu geringerem Verschleiß beim Zerspanen.	[14]
AlCrSiN/TiN	CAE	Untersuchung des Einflusses der Biasspannung und der Ausgangskantengeometrie auf den Kantenradius, Schärfung der Schneidkante während der Beschichtung. Der Keilwinkel ändert sich durch Beschichtung nur in geringem Maß.	[15]

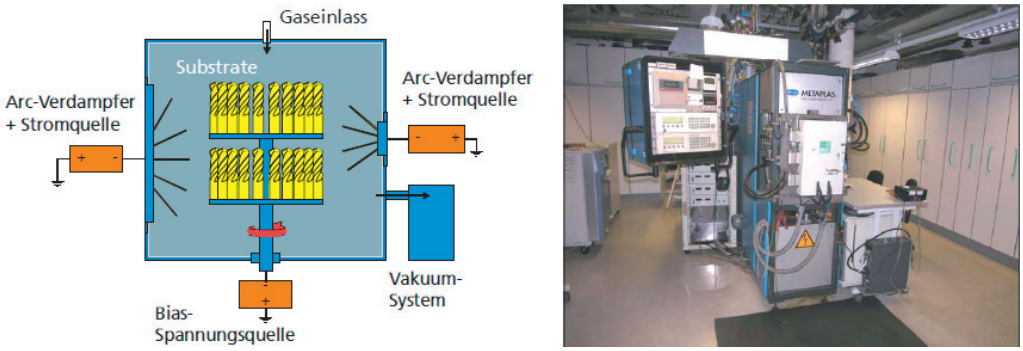


Abb. 3: Beschichtungsanlage MR313 am IWS, links: Schema einer Beschichtungskammer, rechts: Foto

Tab. 2: Verwendete Kathodenmaterialien

Verdampfer	*Abmessungen; Zusammensetzung*	*Al:Cr-Verhältnis*
Ti	440 x170 x 20 mm; 100 Atom-%	-
AlCr	Ø 105 x 15 mm; 70:30 Atom-%	2,33
AlCrSi	Ø 105 x 15 mm; 66:29:5 Atom-%	2,28
AlCrSi	Ø 105 x 15 mm; 60:30:10 Atom-%	2,00

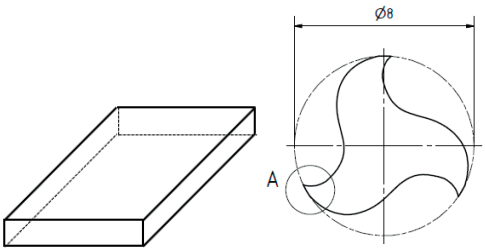


Abb. 4: Probensatz (links: Flachprobe; rechts: Dreischneidengeometrie, A = 5 µm; 10 µm; 15 µm)

Tab. 3: Prozessparameter und deren Einstellgrößen

Prozessparameter	*Einstellgröße*
Prozessgas und -druck	Stickstoff; 1-10 Pa
Verdampferstrom	100A
Substratvorspannung (Bias)	0 bis -900 V
Rotation	zweifach; 5 U/min
Abstand Verdampfer-Substrat	
Rundverdampfer (Mischkathode)	*10-25 cm*
Rechteckverdampfer (Ti)	*9-24 cm*

Sind die Oberflächen präpariert, schließt sich die Abscheidung einer wenige Nanometer dünnen TiN-Haftschicht an, welche die Haftung zwischen Grundwerkstoff und Funktionsschicht gewährleisten soll. Die Abscheidungen der Funktionsschichten erfolgen dabei mit den in *Tabelle 2* und *Tabelle 3* angegebenen Kathodenmaterialien und Beschichtungsparametern.

Für eine umfassende Schichtcharakterisierung standen die Analysemethoden in *Tabelle 4* zur Verfügung.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Chemische und strukturelle Analyse

Bei der Untersuchung der abgeschiedenen Schichten (hier auf Flachsubstraten) ist das Al:Cr-Verhältnis von besonderem Interesse. Dieses Verhältnis stellt sich in Abhängigkeit der Prozessparameter ein und lässt über die Veränderung des Verhältnisses eine Variation der kristallinen Phasen in der Schicht zu. Nachfolgend ist die Auftragung (*Abb. 5*) des Al:Cr-Verhältnisses über der angelegten negativen Biasspannung verschiedener Schicht- und Abscheidevarianten abgebildet.

Auffällig ist, dass bei allen Schichtvarianten das Al:Cr-Verhältnis mit steigender Biasspannung und steigendem Druck anfänglich leicht absinkt, ab

Tab. 4: Verwendete Analysemethoden und -geräte

Methode	*Gerät*	*Gegenstand der Charakterisierung*
Kalottenschliff	KSG110	Bestimmung der Schichtdicke, Berechnung der Beschichtungsrate
Rasterelektronenmikroskopie (REM)	JEOL 6610	Abbilden der Oberflächenmorphologie, der Schichtstruktur
Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX)	JEOL 6610 + XMax 80 mm^2	Bestimmung der chemischen Zusammensetzung
Röntgendiffraktometrie (XRD)	BRUKER 5500	Bestimmung der Kristallstruktur
Focused Ion Beam (FiB), Cross Section Polisher (CSP), Metallogr. Präparation	JIB-4610F	Präparation eines Schichtquerschnitts
Optische 3D-Mikroskopie	Alicona Infinite Focus	Vermessung der Kantengeometrie (Kantenradius und Keilwinkel)
Instrumentierte Härteprüfung	ZwickRoell ZHN 1	Bestimmung der Eindringhärte und des Eindring-E-Moduls

downloaded from www.hanser-elibrary.com by SLUB Dresden on December 1, 2021
For personal use only.

downloaded from www.hanser-elibrary.com by SLUB Dresden on December 1, 2021
For personal use only.

einem bestimmten materialabhängigen Wert jedoch stark ansteigt. Es lässt sich somit im Vergleich zur Zusammensetzung des Ausgangsmaterials (*Tab. 2*) des Verdampfers die Zusammensetzung in der Schicht in Abhängigkeit von Druck und Biasspannung variieren. Dabei führt das steigende Al:Cr-Verhältnis über der Biasspannung auch zu einer veränderten Phasenbildung im Material (*Abb. 6*).

Deutlich wird der Einfluss von Druck und Biasspannung auch bei der Untersuchung der kristallinen Phasen in den jeweiligen Schichten mittels Röntgendiffraktometrie. *Abbildung 6* zeigt beispielhaft, welche Phasen sich während der Abscheidung bilden können.

Dem Diffraktogramm ist zu entnehmen, dass die Reflexe sich leicht verschieben und dass sich ab einer Biasspannung von etwa -500 V eine weitere Phase, hexagonales AlN, bildet und es zu einer Reflexverbreiterung kommt. Anhand der Intensität und Breite der einzelnen Reflexe ist zudem eine leichte Abnahme der Kristallinität und der Kristallitkorngröße festzustellen.

3.2 Beschichtungsrate auf Flachsubstraten

Charakteristisch für jeden Beschichtungsprozess ist dessen Beschichtungs- oder auch Abscheiderate. Diese Größe gibt an, welche Schichtdicke in einer bestimmten Zeiteinheit unter den jeweiligen Prozessbedingungen erzielt werden kann. In Abhängigkeit von der an das Substrat angelegten Biasspannung lassen sich aus dem Verlauf Rückschlüsse auf die Beschichtbarkeit von komplexen Geometrien ziehen, da dort besonders an Spitzen, Ecken und Kanten durch Effekte im elektrischen Feld (*Abb. 1*) höhere Feldstärken wirken. Ähnlich verhält es sich an konkaven Bereichen, Senken, Bohrungen o.ä., nur dass dort die effektiv wirkenden Spannungen im Vergleich zur tatsächlich anliegenden Biasspannung abgesenkt werden.

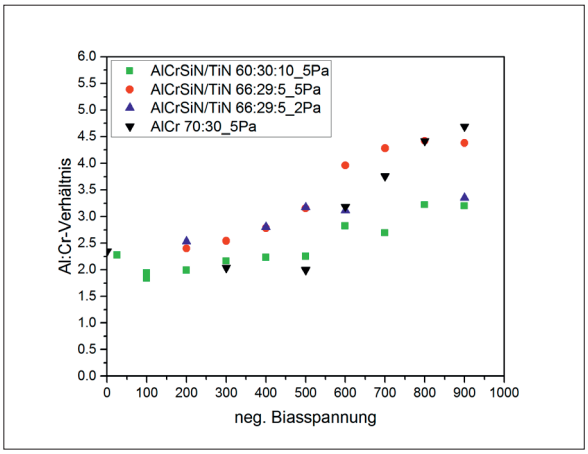


Abb. 5: Al:Cr-Verhältnis in Abhängigkeit von der Biasspannung

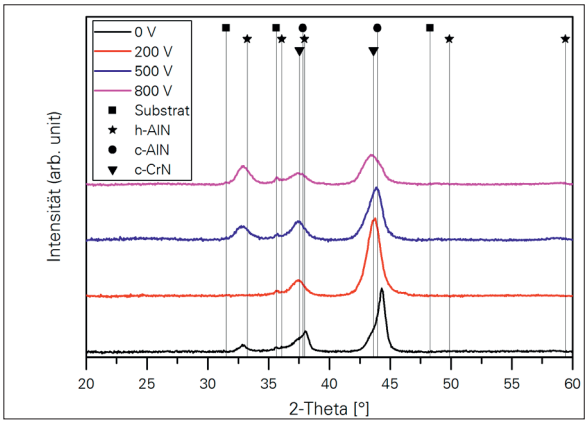


Abb. 6: Diffraktogramm des Schichtsystems AlCrSiN/TiN 66:29:5, N2-Druck 5 Pa

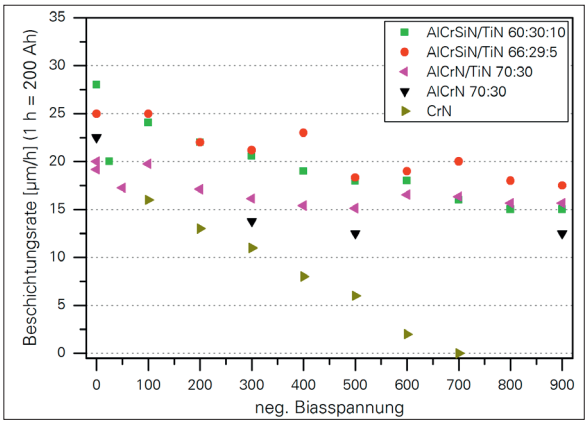


Abb. 7: Verlauf der Beschichtungsrate versch. Schichtsysteme in Abhängigkeit von der an das Substrat angelegten negativen Biasspannung

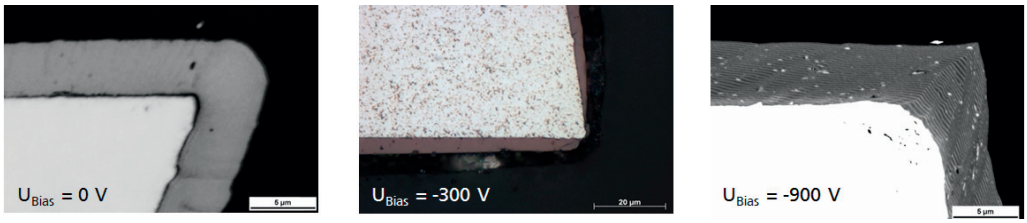


Abb. 8: Vergleich Stand der Technik mit neuem Schichtsystem; links: starke Kantenverrundung bei 0 V Bias; Mitte: Abplatzung an der Kante schon bei -300 V Bias; rechts: neuentwickeltes Schichtsystem mit Bildung einer scharfen Kante bei -900 V

downloaded from www.hanser-elibrary.com by SLUB Dresden on December 1, 2021
For personal use only.

Für verschiedene Schichtsysteme mit mono- oder nanolagigem Aufbau wurde die Beschichtungsrate über der angelegten negativen Biasspannung bestimmt (*Abb. 7*). Bei herkömmlichen monolagigen Schichtsystemen, wie bspw. CrN, kommt es mit steigender Biasspannung zu einem linearen Abfall der Beschichtungsrate. Oberhalb einer Grenzspannung wird keine Schicht mehr aufgetragen, vielmehr kommt es zum Abtrag des Substrates aufgrund der mit hoher Energie auftreffenden Beschichtungsteilchen. Anders verhält es sich bereits bei dem binären System AlCrN. Hier fällt die Beschichtungsrate auch mit zunehmender Spannung ab etwa -300 V kaum noch ab. Das heißt, dass auch mit höherer Spannung noch Schicht aufgebracht werden kann. Besonders deutlich wird dieser Sachverhalt bei nanolagigen Schichtsystemen wie AlCrSiN/TiN. Hier kommt es aufgrund des gleichzeitigen Betriebs der beiden Verdampfer zu einem lagigen Schichtaufbau, welcher im Vergleich zu monolagigen Systemen höhere Abscheideraten und ein geringeres Absenken aufweist. Die Änderung der Abscheiderate weist auf das Auftreten der hexagonalen AlN-Phase ab einer Biasspannung oberhalb 500 V hin (*Abb. 6* und *Abb. 7*).

Der bisherige Stand der Technik lässt zwar konturtreue Beschichtungen in engen Grenzen zu, allerdings werden hohe Biasspannungen vermieden, da es besonders an Kanten zu Störungen des Schichtaufbaus (*Abb. 8, Mitte*) kommen kann. Des Weiteren wird die Schichtdicke in der industriellen Praxis meist auf wenige Mikrometer beschränkt, um eine Kantenverrundung (eine Steigerung des Kantenradius‘), wie sie bei sehr geringen bis keinen Biasspannungen (*Abb. 8, links*) auftritt, zu vermeiden. Mit dem in Zusammenarbeit zwischen der TU Dresden und dem Fraunhofer IWS entwickelten Schichtsystem und dem Schärfungseffekt (*Abb. 8, rechts*) ist es somit möglich, den bisherigen Stand der Technik deutlich zu erweitern.

4 Geometrische Analyse ausgewählter Geometrien

Mit dem optischen 3D-Messsystem Alicona Infinite Focus 4G der Firma Alicona wurden Schneidkanten und Keilwinkel (*Abb. 9*) präzise vermessen.

Die Ergebnisse sind in den *Abbildungen 10* und *11* veranschaulicht. Während sich der Schneidkantenradius im Vergleich zur unbeschichteten Ausgangsprobe ohne Vorhandensein einer Biasspannung in etwa verdreifacht (für Ausgangsradien von 5 µm) bzw. verdoppelt (Ausgangsradius 10 µm), lässt sich der Schneidkantenradius bei Beschichtungen mit Biasspannungen (-500 V und 900 V) deutlich reduzieren. Im Falle von Ausgangsradien von 10 bzw. 15 µm lässt sich eine Halbierung des Ausgangskantenradius erzielen. Bei Ausgangsradien von 5 µm wird der Schneidkantenradius kaum beeinflusst.

Neben dem Schneidkantenradius ist der Keilwinkel der Schneide eine wichtige Ausgangsgröße in der Zerspanungstechnik. Der Auftragung (*Abb. 11*) ist zu entnehmen, dass sich der Keilwinkel unabhän-

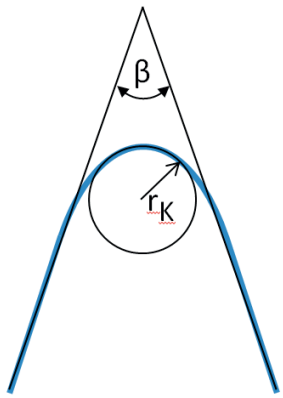


Abb. 9: Prinzipskizze einer Schneidkante mit Angabe des Schneidkantenradius‘ r_K und des Keilwinkels β

downloaded from www.hanser-elibrary.com by SLUB Dresden on December 1, 2021
For personal use only.

gig von Beschichtungsparametern und Ausgangsschneidkantenradius generell vergrößert. Der Effekt nimmt jedoch mit zunehmender Biasspannung leicht ab. Für die Schneide heißt das somit, dass sich der Keilwinkel durch die Beschichtung vergrößert, jedoch der Schneidkantenradius verringern lässt.

Anhand von REM-Aufnahmen (*Tab. 5*) soll verdeutlicht werden, welche Schichtmorphologie sich in Abhängigkeit vom Ausgangskantenradius und der anliegenden Biasspannung im Kantenbereich ausbildet.

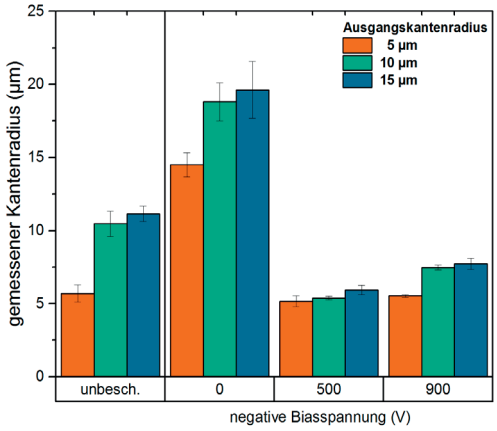


Abb. 10: Schneidkantenradius vor und nach der Beschichtung in Abhängigkeit vom Ausgangsradius und der Biasspannung (nominell gleiche Schichtdicke bei jeweiliger Biasspannung)

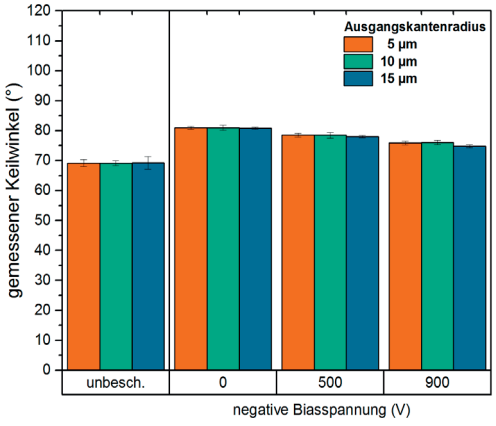


Abb. 11: Keilwinkel vor und nach der Beschichtung in Abhängigkeit vom Ausgangsradius und der Biasspannung

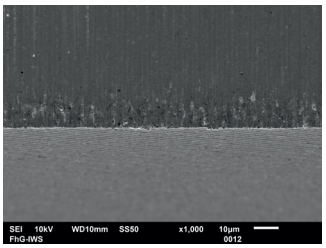
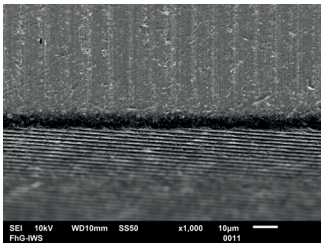
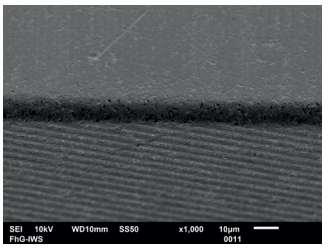
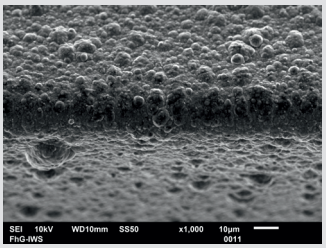
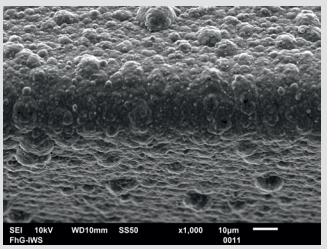
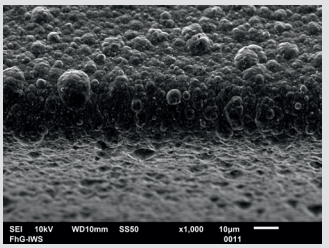
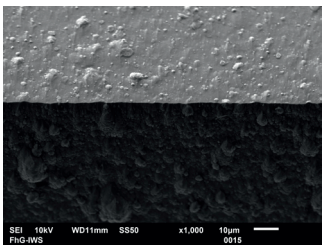
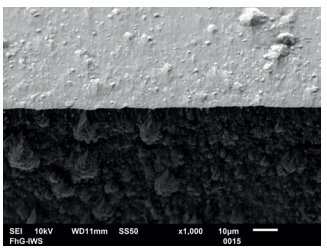
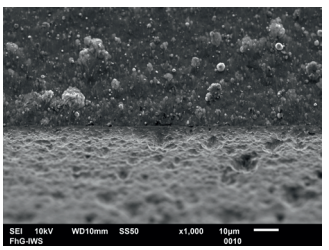
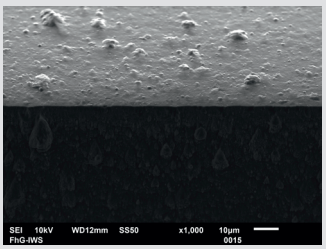
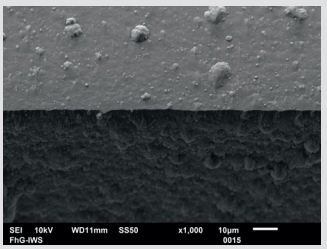
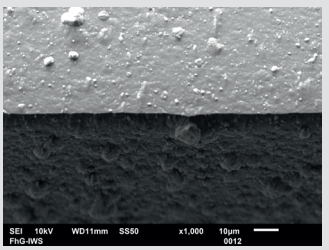
Mithilfe der Abbildungen lässt sich auch nachvollziehen, warum die Fehlerintervalle bei der Vermessung der Schneidkantenradien vor allem bei den Ausgangsschneiden und bei der Beschichtung mit 0 V Bias im Vergleich zu den Beschichtungen mit höherer Biasspannung größer sind. Der Ausgangszustand weist noch die Bearbeitungsrauheit bzw. Schleifriefen auf, während bei der Beschichtung mit 0 V Bias eine besonders hohe Partikelbelastung auf der Schneidkante vorliegt. Mit zunehmender Biasspannung kommt zur Schärfung der Schneidkanten also noch ein Glättungs- oder Einebnungseffekt zum Tragen, welcher zu einer insgesamt besseren Kantenqualität führt.

5 Härte und E-Modul

Härte und Elastizitätsmodul sind wichtige Kenngrößen, die das mechanische Verhalten der Schichten beschreiben. Eine hohe Härte ist anzustreben, um eine möglichst hohe Schutzwirkung zu erzielen. Der Elastizitätsmodul dagegen beschreibt den Widerstand gegen elastische Verformung – je höher der Wert, desto höher der Verformungswiderstand. Die untersuchten Schichten wurden mittels des Nanoindentationsversuchs charakterisiert. Dabei ist festzustellen, dass Härte und E-Modul sich in Abhängigkeit von wesentlichen Prozessparametern wie Biasspannung und Prozessgasdruck variieren lassen. Dies bietet die Möglichkeit, die Eigenschaften der Schichten auf gewünschte Werte einzustellen. In den *Abbildungen 12* und *13* sind jeweils die Härte- und E-Modul-Verläufe für verschiedene Schichten aufgetragen.

Im Vergleich zu den Härteverläufen von Monolagenschichtsystemen (AlCrN) sind die von Multilagenschichten (AlCrSiN/TiN) deutlich flacher. Es zeigt sich, dass mit Multilagenschichten trotz steigender Biasspannung die Änderung der mechanischen Eigenschaften relativ moderat ist. Dies bringt den Vorteil mit sich, dass sich an Stellen örtlicher Überhöhung des elektrischen Feldes (bspw. an Kanten) die Eigenschaften der Schicht nicht zu stark von den Bereichen unterscheiden, an denen die Feldstärke nicht überhöht oder gar abgesenkt (Vertiefungen/Löcher) ist. Verstärken lässt sich dieser ausgleichende Effekt noch mit einer Variation des Beschichtungsdruckes. Je niedriger der Druck (Vergleich 5 Pa zu 2 Pa) ist, desto gleichmäßiger sind die Verläufe von Härte und E-Modul über der Biasspannung.

Tab. 5: Draufsicht auf Schneidkanten vor und nach der Beschichtung in Abhängigkeit von der Biasspannung

Ausgangskantenradius 5 µm	*Ausgangskantenradius 10 µm*	*Ausgangskantenradius 15 µm*
unbeschichtet	unbeschichtet	unbeschichtet
		
beschichtet mit 0 V Bias	beschichtet mit 0 V Bias	beschichtet mit 0 V Bias
		
beschichtet mit -500 V Bias	beschichtet mit -500 V Bias	beschichtet mit -500 V Bias
		
beschichtet mit -900 V Bias	beschichtet mit -900 V Bias	beschichtet mit -900 V Bias
		

downloaded from www.hanser-elibrary.com by SLUB Dresden on December 1, 2021
For personal use only.

downloaded from www.hanser-elibrary.com by SLUB Dresden on December 1, 2021
For personal use only.

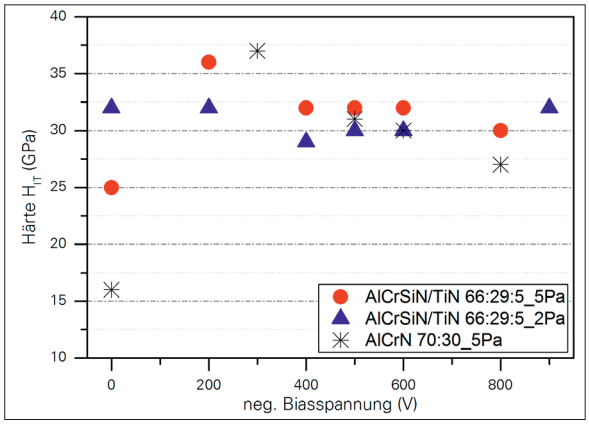


Abb. 12: Abhängigkeit der Schichthärte von der an das Substrat angelegten negativen Biasspannung

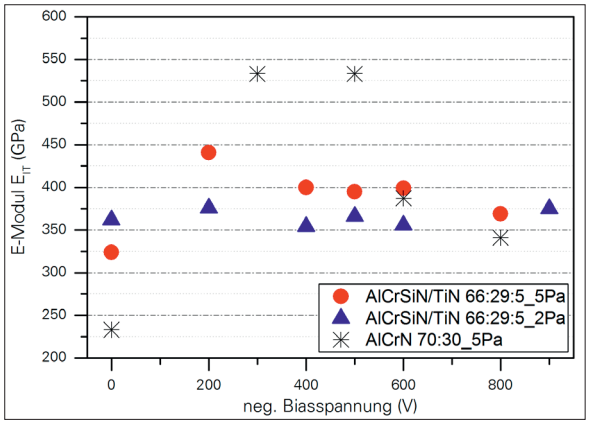


Abb. 13: Abhängigkeit des E-Moduls von der an das Substrat angelegten negativen Biasspannung

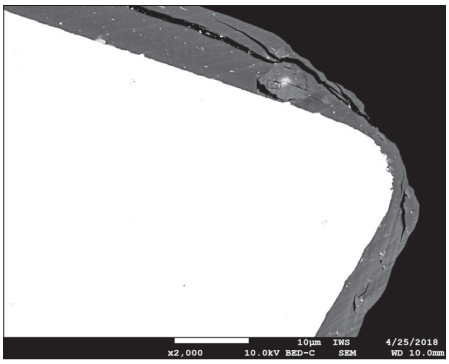


Abb. 14: Beschichtete Kante mit einem Ausgangsradius von 15 µm, beschichtet mit einer AlCrSiN-Monolage bei einem Stickstoffdruck von 5 Pa und einer Biasspannung von -500 V

6 Herausforderungen bei der Kantenbeschichtung

Neben der Beschichtbarkeit gekrümmter Bereiche, wie im Falle der Werkzeugschneide, stellt sich immer auch die Frage nach der Integrität der Beschichtung in diesem Bereich. Werkzeugkanten bilden aufgrund der Spannungskonzentration an Spitzen (sog. Keilwirkung) einen potentiellen Ausgangspunkt von Rissen, die im schlimmsten Fall die Zerstörung der Schicht nach sich ziehen. Verdeutlicht werden soll dieser Effekt in den *Abbildungen 14* und *15*.

6.1 Monolagen

Monolageschichten, wie AlCrSiN, zu sehen in *Abbildung 14*, sind besonders bei hohen Biasspannungen anfällig für Abplatzungen und Schichtversagen. Dieser Effekt verhindert die Nutzung eines solchen Schichttyps oder beschränkt die Anwendung auf niedrige negative Biasspannung bis etwa 100 V, geringe Schichtdicken und weniger spitze Geometrien.

6.2 Multilagen

Im Vergleich zum monolithischen Schichtsystem sind Multilagenschichtsysteme deutlich widerstandsfähiger und lassen auch deutlich höhere Biasspannungen bei der Schichtabscheidung zu. Zum einen kommt es zu einer Einebnung von Schichtwachstumsdefekten (*Abb. 15, links, Kreis*) im Vergleich zu Schichten, die ohne Biasspannung aufwachsen (*Abb. 15, rechts, Pfeile*). Zum anderen ist durch eine hohe Spannungskonzentration im Kantenbereich aufgrund von Schichteigenspannungen das Ausbilden von Rissen (*Abb. 15, links*) möglich.

Einen industriell bereits erprobten Arbeitsschritt stellt die Kantenpräparation vor einer Beschichtung dar [17]. Hierbei soll mittels einer gezielten Kantenpräparation die Qualität der unbeschichteten Kanten sowie die anschließende Beschichtung verbessert werden.

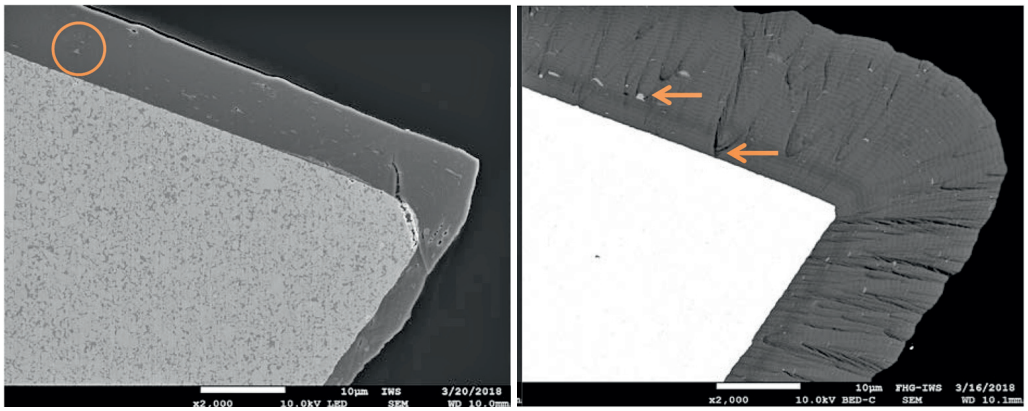


Abb. 15: Aufwachsen einer scharfen Kante (links) und einer verrundeten Kante (rechts)

Ein größerer Kantenradius führt zu einer geringeren Keilwirkung und kann aber ggf. durch die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Beschichtungsprozesse durch die Beschichtung wieder reduziert werden. Weitergehende Untersuchungen und Schichtentwicklungen sollen in der Zukunft zu einer industriell anwendbaren Beschichtungslösung führen, die es ermöglicht, die Kantengeometrie während der Beschichtung gezielt einzustellen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Studie wurden neue Ansätze für die Beschichtung von Werkzeugen auf Basis von AlCrSiN/TiN-Schichten mittels Arc-PVD-Prozessen zur Beschichtung von Schneidkanten, einer Verbesserung der Kantenbedeckung und der Senkung des Radius an der Schneide erzeugt und erprobt. Die Untersuchung des Effektes zur Reduzierung bei dem System AlCrSiN/TiN ergab sich aus Vorversuchen an der TU Dresden und dem Fraunhofer IWS. Bei der Entwicklung der Beschichtungsprozesse wurde ein mehrlagiges Schichtsystem verwendet. Die Beschichtung komplexer Geometrien (z.B. Kanten) mit den entwickelten Schichten ist prozesssicher möglich, auch trotz erhöhter Biasspannung. Der Grund für dieses gegenüber monolithischen Schichtsystemen bemerkenswerte Verhalten ist auf eine besondere Abscheidecharakteristik des verwendeten Schichtsystems, eine ausgeprägte Lagigkeit, die chemische Zusammensetzung und die damit zusammenhängende Phasenbildung und ein vermutlich stattfindendes Ionenätzen zurückzuführen. Durch die Anwendung des beschriebenen Schichtsystems und der im Projekt entwickelten Abscheideprozesse sind eine deutliche Senkung des Schneidkantenradius‘ und ein durch die Beschichtung einstellbarer Endradius möglich. Zukünftig sollen industriell anwendbare Schichten bereitstehen, die neben der durch den Beschichtungsprozess gezielt einstellbaren Kantengeometrie auch eine besonders hohe Stabilität aufweisen.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde finanziell gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Projektes mit dem Förderkennzeichen LE 1373/25-1. Den beteiligten Mitarbeitern vom Fraunhofer IWS und der Professur für Werkstofftechnik an der TU Dresden sei an dieser Stelle herzlich gedankt. Darüber hinaus haben viele engagierte Studenten mit ihren Studien-, Diplom- und Masterarbeiten wichtige Beiträge geliefert.

Literatur

[1] Johansson, B.O. et al.: Influence of substrate shape on TiN films prepared by reactive sputtering, Thin Solid Films 111, 1984, 313–322

[2] Rother, B. et al.: Characterization of TiN-coated high speed steel cutting edges by load- indentation measurements, Surface and Coatings Technology 79, 1996, 225–230

[3] Rother, B. et al.: Property distribution on three-dimensionally shaped PVD-coated samples, Surface and Coatings Technology 97, 1997, 200–205

[4] Jehn, A.H. et al.: PVD coating of 3D parts studied with model samples, Surface and Coatings Technology 94–95, 1997, 232–236

[5] Kim, S.S. et al.: Deposition behaviours of CrN films on the edge area by cathodic arc plasma deposition process, Thin Solid Films 334, 1998, 133–139

[6] Novák R. et al.: Study of hard PVD coatings on strongly curved surfaces, Surface and Coatings Technology 114, 1999, 65–69

[7] Macak, E.B. et al.: Electron microscopy studies of hard coatings deposited on sharp edges by combined cathodic arc/unbalanced magnetron PVD, Surface and Coatings Technology 151–152, 2002, 349–354

[8] Macak, E.B. et al.: Edge related effects during ion assisted PVD on sharp edges and implications for coating of cutting tools, Surface Engineering 19, 2003, 310–314

downloaded from www.hanser-elibrary.com by SLUB Dresden on December 1, 2021
For personal use only.

[9] Macak, E.B. et al.: Plasma-surface interaction at sharp edges and corners during ion-assisted physical vapor deposition, Part I: Edge-related effects and their influence on coating morphology and composition, J. Appl. Phys. 94, 2003, 2829–2836

[10] Macak, E.B. et al.: Plasma-surface interaction at sharp edges and corners during ion-assisted physical vapor deposition.‚Part II: Enhancement of the edge-related effects at sharp corners, J. Appl. Phys. 94, 2003, 2837–2844

[11] Flöter, A. et al.: Verbesserung der Schärfe diamantbeschichteter Hartmetallklingen, IDR 38, 2004, 110–112

[12] Qin, F. et al.: Coating thickness effects on diamond coated cutting tools; Surface and Coatings Technology 204, 2009, 1056–1060

[13] Sato, Y. et al.: Sharpening of CVD diamond coated tools by 0.5−10 keV Ar+ ion beam, Diamond and related Materials 20, 2011, 954–959

[14] Bohlmark, J. et al.: Evaluation of Arc Evaporated Coatings on Rounded Surfaces and Sharp Edges, Materials Science Forum 681, 2011, 145–150

[15] Krülle, T. et al.: Nano-Design für Makroschichten, Vakuum in Forschung und Praxis 30, 2018, 46–49

[16] Watterson, P.A.: Child-Langmuir sheath structure around wedge-shaped cathodes, J. Phys. D: Appl. Phys. 22, 1989, 1300–1307

[17] Tikal, F.: Schneidkantenpräparation – Ziele, Verfahren und Messmethoden, Kassel university Press GmbH, Kassel, 2009

downloaded from www.hanser-elibrary.com by SLUB Dresden on December 1, 2021
For personal use only.